



### **Science Arts & Métiers (SAM)**

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>  
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/6597>

#### **To cite this version :**

Antoine DUGUE, Denis BRUNEAU, Alain SOMMIER, Philippe LAGIERE - Prise en compte de protections solaires perméables semi-transparentes dans la modélisation des échanges bâtiment-environnement : proposition d'une modélisation simple et flexible. - 2012

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : [scienceouverte@ensam.eu](mailto:scienceouverte@ensam.eu)



# Prise en compte de protections solaires perméables semi-transparentes dans la modélisation des échanges bâtiment-environnement : proposition d'une modélisation simple et flexible.

Antoine DUGUE<sup>a,b</sup>, Denis BRUNEAU<sup>b</sup>, Alain SOMMIER<sup>b</sup>, Philippe LAGIERE<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>Nobatek, (auteur correspondant : adugue@nobatek.com)

67, rue de Mirambeau 64600 ANGLET

<sup>b</sup>Arts et Métiers ParisTech, I2M, UMR 5295, F-33400 Talence, France.

Univ. Bordeaux, I2M, UMR 5295, F-33400 Talence, France.

CNRS, I2M, UMR 5295, F-33400 Talence, France.

## Résumé

L'objectif de cette étude est de produire une description précise du comportement énergétique de solutions de protections solaires, de manière à développer un modèle aisément intégrable dans une plateforme de simulation commercialisée. Un modèle en 1D prenant en compte les échanges radiatifs de manière fine et intégrant le flux laminaire ascendant prenant place dans la cavité entre la protection solaire et la paroi est ainsi proposé. Une étude expérimentale permet de confirmer les choix de modélisation et le paramétrage de ceux-ci ainsi que la validation.

## Nomenclature

Cd	Coefficient de décharge	W	Largeur de la protection solaire, <i>m</i>
<i>Cp</i>	Capacité thermique massique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	<i>Symboles grecs</i>	
<i>e</i>	Epaisseur de la lame d'air, <i>m</i>	$\varphi$	Densité de flux de chaleur, $W.m^{-2}$
<i>g</i>	Constante de gravité, $m.s^{-2}$	$\tau$	Coefficient de transmission
<i>H</i>	Hauteur de la protection solaire, <i>m</i>	$\rho$	Coefficient de réflexion
<i>h</i>	Coefficient d'échange convectif, $W.m^{-2}.K^{-1}$	$\alpha$	Coefficient d'absorption
<i>I<sub>s</sub></i>	Flux solaire radiatif incident, $W.m^{-2}$	$\mu$	Perméabilité de la protection solaire
$\dot{m}$	Débit massique d'air, $kg.s^{-1}$	<i>Indices et exposants</i>	
<i>Nu</i>	Nombre de Nusselt	CLO	Relatif aux courtes longueurs d'onde
<i>Q</i>	Flux de chaleur par advection dans la lame d'air, <i>W</i>	GLO	Relatif aux grandes longueurs d'onde
<i>Re</i>	Nombre de Reynolds	int	Côté intérieur
<i>Ra</i>	Nombre de Rayleigh	ext	Côté extérieur
<i>p</i>	La pression de l'air, <i>Pa</i>	sh	Relatif à la protection solaire
<i>T</i>	Température, °C	w	Relatif au mur
<i>v</i>	Vitesse d'écoulement de l'air dans la lame d'air interstitiel, $m.s^{-1}$	sun	Relatif au soleil
<i>V<sub>ext</sub></i>	Vitesse du vent extérieur, $m.s^{-1}$		

## 1. Contexte, et objectif

Le développement croissant de bâtiments fortement vitrés, alors assujettis à de forts apports solaires induit une plus grande utilisation de solutions de protections solaires tels que les toiles textiles ou les écrans végétaux qui permettent aussi de bénéficier des apports passifs hivernaux. Cependant la prise en compte de ces éléments par les plateformes de modélisation est peu précise notamment pour l'écoulement d'air induit entre la solution et la paroi du bâtiment.

L'étude présente une modélisation des transferts de chaleur prenant place à l'échelle d'une paroi. Un mur associé à une solution de protection solaire est instrumenté. On propose ici une analyse de différents modèles d'écoulement inter mur-protection solaire. L'analyse des mesures réalisées pour une protection de type bardage bois permet de réaliser un choix de modèle d'écoulement et son paramétrage. Le modèle thermique complet est ensuite validé par comparaison des résultats ainsi obtenus avec les mesures expérimentales.

L'objectif final de cette étude est double. Il s'agit de mieux savoir décrire l'impact apporté par les solutions de protection solaire afin d'améliorer les conditions de leurs utilisations ; et aussi de proposer un modèle simple qui permet d'envisager la prise en compte de ces systèmes dans les plateformes de simulation thermique de bâtiments, ceci par le développement et l'intégration d'un module spécifique décrivant leur impact énergétique.

## 2. Protocole expérimental

Afin de quantifier les flux de chaleur prenant place dans la configuration d'étude, un protocole expérimental a été mis en place pour permettre l'instrumentation du complexe composé d'une protection solaire et du mur associé. Un isolant de 50mm a été rapporté sur un mur existant ainsi que deux plaques de plâtre de 13mm, c'est devant celles-ci que se place la solution étudiée en laissant une lame d'air ouverte en parties basse et haute.

L'instrumentation (voir figure 1) est faite avec 18 thermocouples placés à trois hauteurs différentes, d'un pyranomètre fonctionnant sur la bande spectrale 400 à 1100nm mesurant le flux solaire vertical à la paroi, un anémomètre à coupelles donnant la vitesse du vent au niveau de la paroi extérieure ainsi qu'un anémomètre à fil chaud situé au milieu de la lame d'air à hauteur médiane.

Des mesures ont été réalisées en juin 2011 pour deux bardages bois opaques avec une lame d'air de 6cm, et d'autres au mois de septembre 2011 avec des toiles textiles de protection solaire.

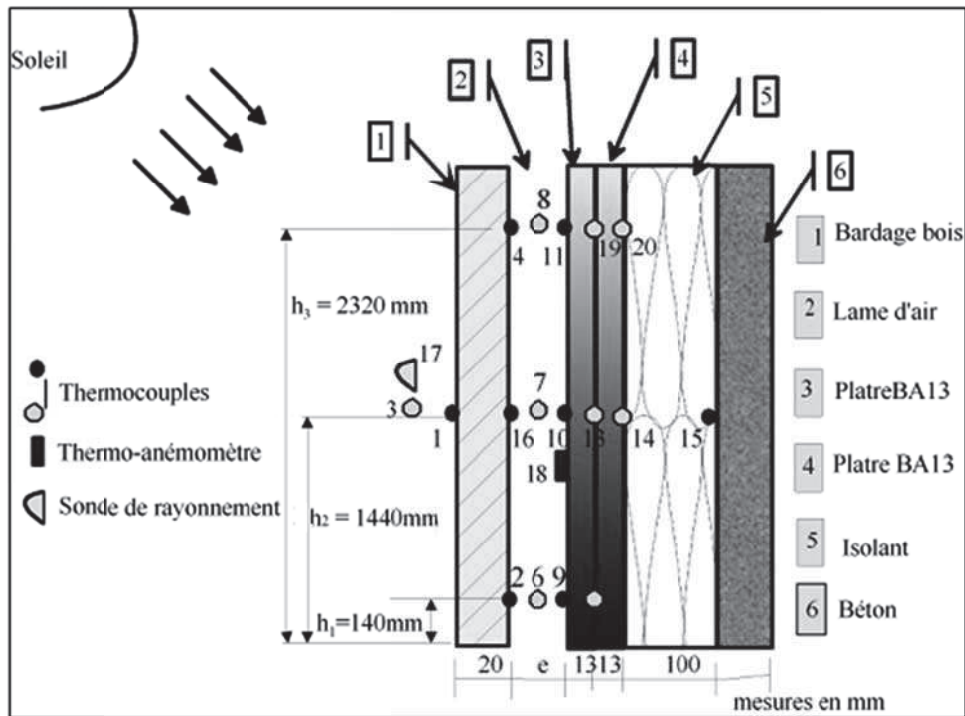


Figure 1 : Schéma indiquant l'emplacement des différents capteurs

Les mesures réalisées sur une période de 40 heures avec un bardage bois sont présentées dans les figures suivantes.

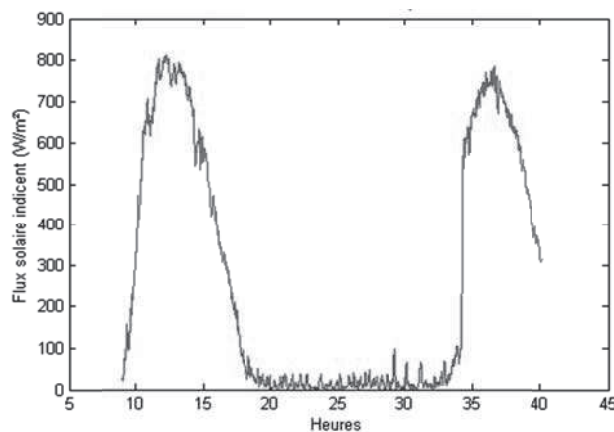


Figure 2 : Eclairement normal incident mesuré

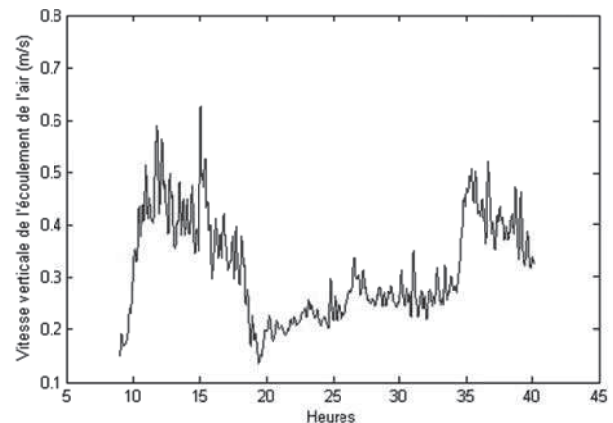


Figure 3 : Vitesse d'écoulement de l'air dans la cavité mesurée

L'évolution de l'éclairement normal incident sur la période est présentée sur la figure 2. Il correspond à deux journées ensoleillées. Sur la figure 3, la vitesse verticale de l'écoulement de l'air dans la lame d'air interstitielle est tracée. On note qu'elle n'est jamais nulle traduisant le mouvement général permanent, et les vitesses maximales atteintes sont de l'ordre de 0,5m/s.

Sur le graphe 4 apparaît l'évolution des températures données par les thermocouples situées à la hauteur médiane. A partir des mesures, nous pouvons constater l'impact qu'apporte la lame d'air ventilé sur l'atténuation et le déphasage. La température d'air dans la lame est toujours supérieure à la température extérieure. L'écart est plus fort pendant la période nocturne lorsque le mouvement d'air dans la lame est faible que pendant la période diurne quand l'écoulement laminaire vertical prend place.

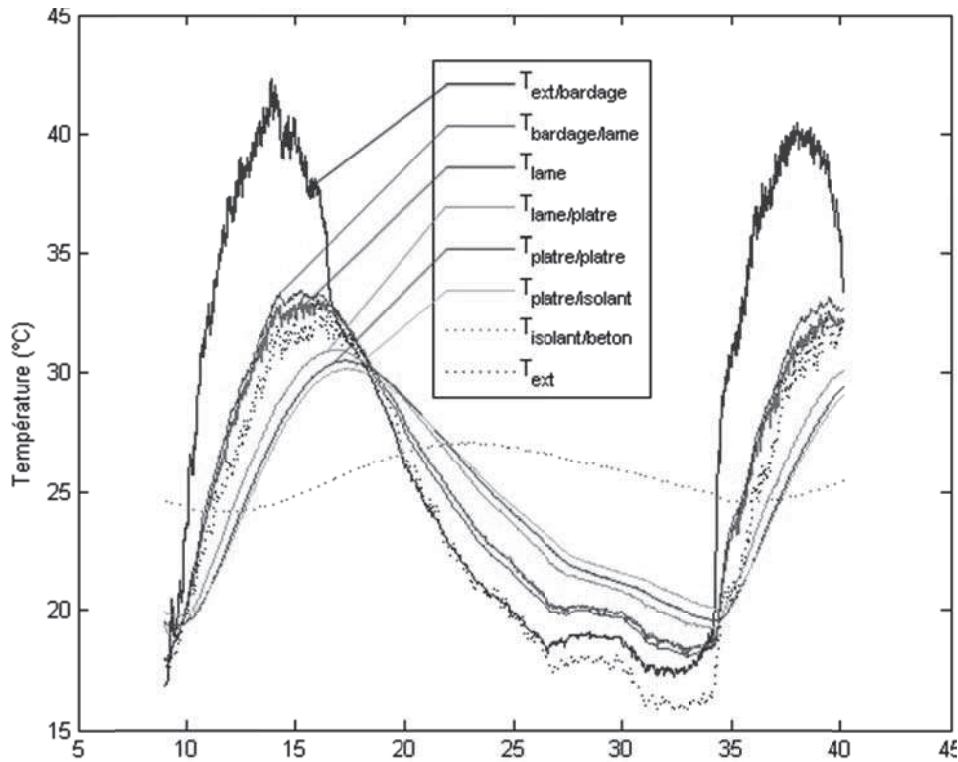


Figure 4 : Températures mesurées en différents points (°C)

### 3. Description modèle développé

Le mur est discrétisé en un ensemble de volumes pour lesquels le bilan d'énergie est écrit en régime dynamique. La modélisation est faite en une dimension (horizontale) et les gradients verticaux de températures dans le mur, la protection solaire ou la lame d'air interstitielle sont négligés. Nous considérons les échanges de type radiatifs, conductifs et convectifs. Nous développons en particulier la modélisation de l'écoulement dans la lame d'air interstitielle, en étudiant deux types de modèle existants et en effectuant un choix basé sur les mesures réalisées.

#### 3.1 Modèle général

##### 3.1.1 Transferts radiatifs

Les échanges radiatifs en courtes longueurs d'onde (CLO) et en grandes longueurs d'ondes (GLO) sont différenciés et le phénomène de multi réflexion est considéré comme présenté par Rodriguez [1].

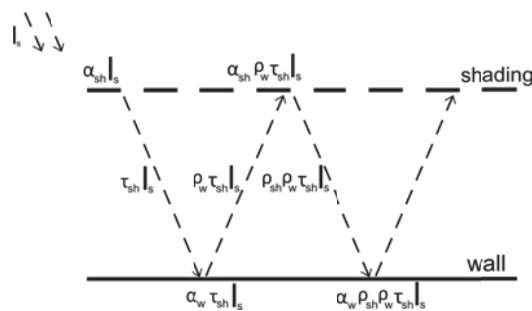


Figure 5 : schéma illustrant le phénomène de multi-réflexion

Le flux total en courtes longueurs d'onde reçu à la surface du mur s'écrit dans une forme développée :

$$\varphi_{\text{sun-w}} = \alpha_{\text{sh,CLO}} \tau_{\text{w,CLO}} I_s + \alpha_{\text{sh}_i, \text{CLO}} \tau_{\text{w,uv}} \rho_{\text{sh}_i, \text{uv}} \rho_{\text{w,CLO}} I_s + \alpha_{\text{sh}} \tau_w (\rho_{\text{sh}_i} \rho_{\text{w,CLO}})^2 I_s + \dots \quad (1)$$

Cette série géométrique peut s'écrire sous la forme d'une somme totale :

$$\varphi_{\text{sun-w}} = \frac{\alpha_{\text{sh,CLO}} * \tau_{\text{w,CLO}}}{1 - \rho_{\text{sh}_i, \text{CLO}} * \rho_{\text{w,CLO}}} I_s \quad (2)$$

### 3.1.2 Flux convectifs

Pour le coefficient de convection extérieure, on considère une surface de rugosité « medium smooth » selon le manuel Ashrae 1989 [2] :

$$h_{\text{ext}} = 8,23 + 4 * V_{\text{ext}} - 0,057 * V_{\text{ext}}^2 \quad (3)$$

Le flux de chaleur par advection dans la lame d'air s'écrit :

$$Q = \dot{m} C_p (T_{\text{ext}} - T_{\text{lame}}) \quad (4)$$

### 3.1.3 Résolution

L'écriture en chaque nœud  $i$  donne une équation différentielle linéaire du premier degré de la forme :

$$\frac{dC_i T_i}{dt} = \sum_j f_j T_j + g(i, T_{\text{ext}}) \quad (5)$$

Que l'on peut alors écrire sous forme matricielle en distinguant les sollicitations intérieures et extérieures, respectivement les matrices  $F$  et  $G$ , et avec  $T$  le vecteur des températures dans le mur et  $U$  composé du flux solaire incident et de la température extérieure.

$$C \frac{dT}{dt} = FT + GU \quad (6)$$

La résolution numérique de cette équation différentielle se fait selon un schéma implicite pour un pas de temps de 1 minute avec l'outil Matlab.

## 3.2 Modèle d'écoulement, détermination de la vitesse et du coefficient d'échange

Différents modèles de convection naturelle entre deux plaques existent – la plupart étant établis pour un régime permanent – on peut en distinguer deux types. Les premiers sont issus de l'écriture du gradient de pression motrice dans la lame d'air en considérant l'air comme un gaz parfait aboutissant à un terme moteur basé sur la différence entre la température dans la lame d'air et la température extérieure. Le manuel ASHRAE et la norme européenne EN13363 «Solar protection devices combined with glazing. Calculation of solar and light transmittance. Simplified method. » se basent sur ce type de corrélation. Ong [3] propose pour un mur trombe la forme suivante :

$$v = C_d e W \sqrt{gH} * \sqrt{\frac{T_{\text{air}} - T_{\text{ext}}}{T_{\text{ext}}}} \quad (7)$$

Les seconds considèrent les flux (possiblement asymétriques) dans les parois adjacentes à la lame d'air pour établir des corrélations entre les nombres de Nusselt et de Rayleigh. Ces modèles numériques sont établis par mécanique des fluides numériques ou de façon expérimentale. Aung [4] donne en 1972 des corrélations entre les nombres de Nusselt, de Rayleigh et le débit. Gan [5] les établit de manière plus générale en 2011 pour un ensemble de configurations sous la forme de deux relations permettant de connaître le coefficient de convection et le débit dans la lame d'air. Celles-ci sont cependant limitées à des situations où le flux donné à l'air est compris entre 100 et 1000W/m<sup>2</sup> et un rapport d'aspect (H/e) entre 5 et 60.

$$\begin{cases} Nu = f\left(Ra, \frac{e}{H}\right) \\ Nu = f(Ra, Re) \end{cases} \quad (8)$$

### 3.3 Premiers résultats et choix du modèle d'écoulement

Pour étudier la pertinence respective de ces deux familles de modèles, la vitesse calculée par la corrélation de Ong, et le termes de radiation solaire moteur dans le deuxième cas sont tracés en fonction de la vitesse d'air mesurée durant une journée d'été ensoleillée.

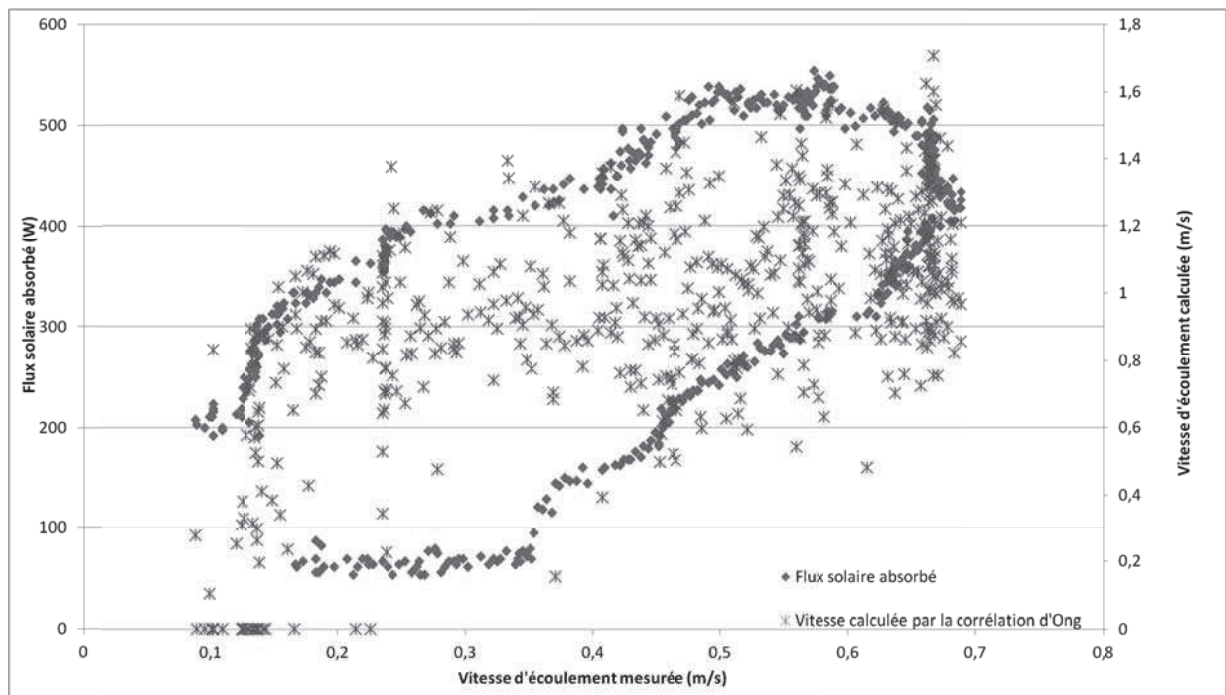


Figure 6 : Vitesses calculées à partir de l'équation 7 et flux solaires absorbés en fonction des vitesses mesurées

Il apparaît que la vitesse ainsi calculée à partir de l'équation (7) est supérieure à la vitesse d'écoulement mesurée et le caractère erratique de la répartition des couples calculés caractérise le fait que la corrélation est faible.

Le flux de chaleur vers la lame d'air, directement lié au rayonnement solaire incident, apparaît comme une meilleure corrélation. Au début de la journée, quand le rayonnement augmente, l'écoulement est faible, il s'établit avec un déphasage de l'ordre d'une heure. A l'inverse à la fin de la journée, alors que le flux incident diminue, la vitesse d'écoulement diminue là aussi avec un déphasage.



Pour la suite, c'est le deuxième type de modèle, donnant une meilleure approximation de la vitesse d'écoulement dans le cas d'un bardage bois, qui a été retenu.

#### 4. Validation

Les mesures sont celles présentées dans les figures 2, 3 et 4. Les températures simulées à partir du modèle développé sont comparées aux mesures réalisées. Nous comparons en 4 points du complexe : sur la face extérieure du bardage, au milieu de la lame d'air, à la surface de la cavité côté intérieur et derrière les deux plaques de plâtre. Ces températures sont tracées sur la figure 8.

Les températures obtenues pour une simulation sans prise en compte de l'écoulement, c'est-à-dire avec la lame d'air interstitiel fermée en parties haute et basse, sont tracées sur la figure 7. On constate une réduction générale de l'erreur entre les températures mesurées et simulées.

On note que les variations de températures sont surestimées par le modèle (les amplitudes de variation sont plus fortes pour les résultats de la simulation que pour les mesures), traduisant le fait que les échanges de chaleur sont en réalité légèrement plus faibles que du modèle.

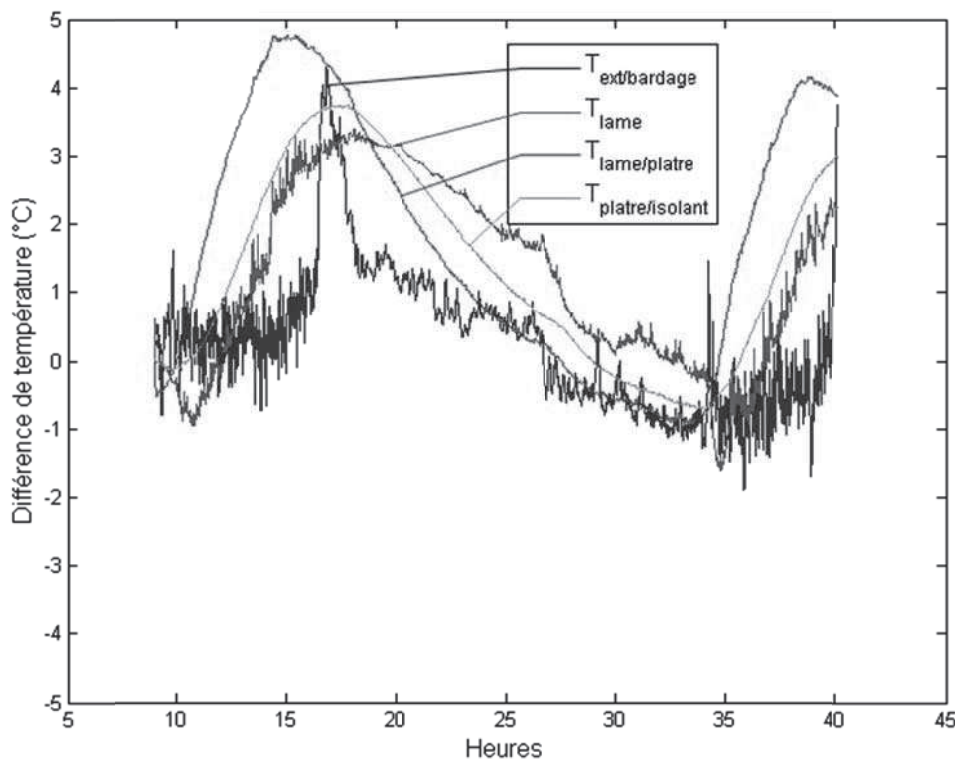


Figure 7 : Différence de température entre la mesure et la simulation sans prise en compte de l'écoulement de l'air dans la lame



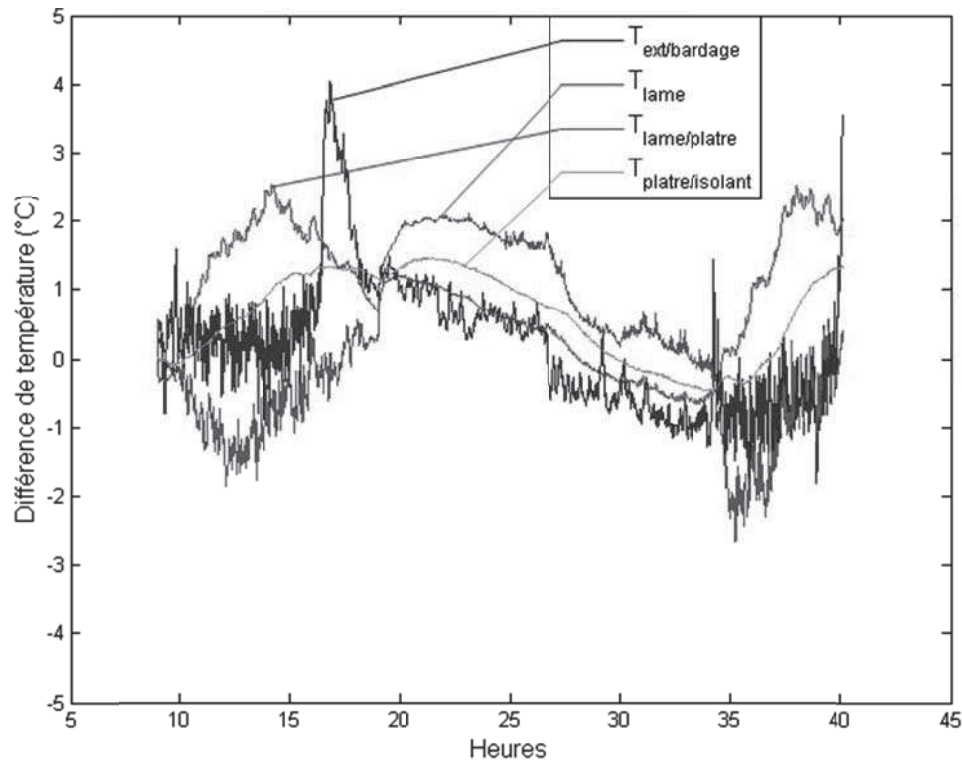


Figure 8 : Différence de température entre la mesure et la simulation avec prise en compte de l'écoulement de l'air dans la lame

Les températures dans la paroi derrière la protection solaire sont bien approximées. Ce sont les plus importantes car elles traduisent le flux de chaleur diffusant dans le mur et donc la sollicitation de l'environnement extérieur vers le bâtiment.

La température de l'air dans la lame est de manière générale légèrement supérieure à la température mesurée pour les périodes d'ensoleillement et inférieure pendant les périodes nocturnes. La perte de chaleur par advection  $Q$  est là aussi un peu surestimée.

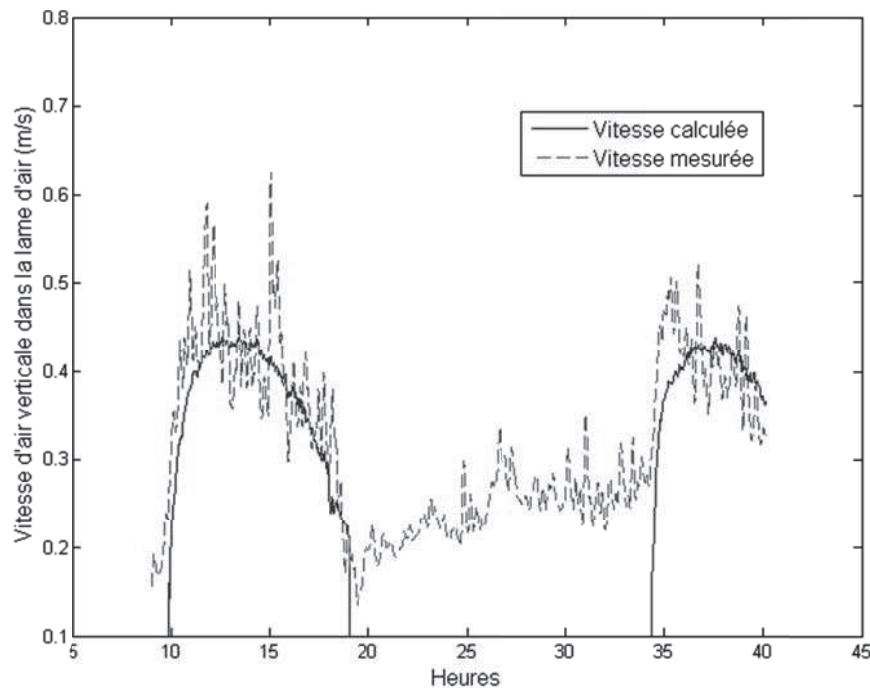


Figure 9 : Vitesse d'air verticale dans la cavité calculée et mesurée

La figure 9 montre la vitesse d'air dans la lame calculée par le modèle ainsi que la vitesse mesurée. La corrélation sélectionnée permet bien d'évaluer la vitesse d'air dans la cavité et en particulier le déphasage entre le maximum de la source de chaleur (le flux solaire incident) et le maximum de l'effet induit (évacuation de chaleur dans la cavité). On remarque pendant la nuit une accélération du mouvement général de l'air dans la cavité qui pourrait être lié à une décharge du mur de chaleur stockée pendant la journée vers la lame d'air.

## 5. Perspectives

### 5.1 Présentation du modèle de la prise en compte de la perméabilité

La solution de protection solaire est caractérisée par sa perméabilité à l'air. Un écoulement horizontal entre la lame d'air et l'extérieur prend place. Nous proposons ici un modèle simple pour le prendre en compte et ainsi recalculer la vitesse moyenne d'écoulement dans la lame d'air afin de mieux quantifier la chaleur évacuée.

Le profil de pression extérieur est connu à partir de la relation  $\vec{\nabla}p = \rho * \vec{g}$

En prenant en compte les pertes de charge et en utilisant la loi de Bernouilli dans la cavité, on peut écrire le profil de pression dans la cavité.

La différence de pression et les propriétés de perméabilité de la solution permettent de calculer le débit en régime permanent entre les deux milieux.

$$v(z) = \frac{k}{\mu * e} * (p_{ext}(z) - p_{lame}(z)) \quad (9)$$

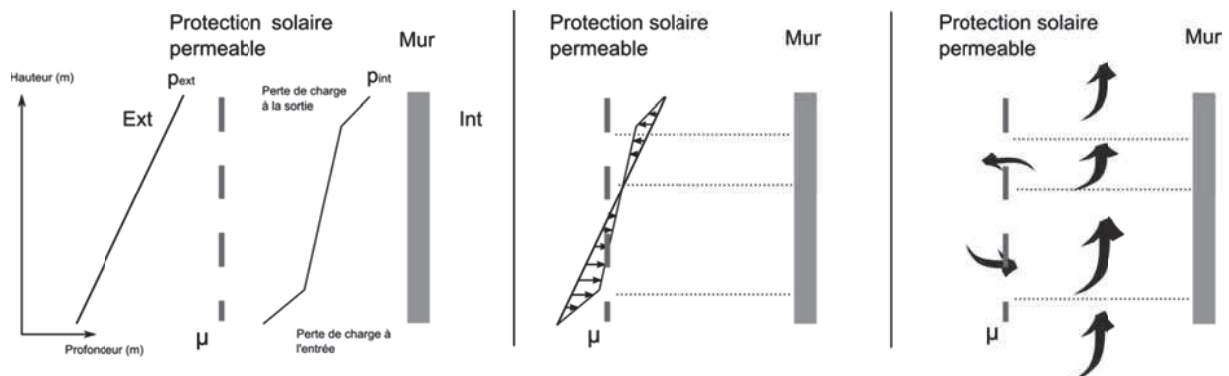


Figure 10 : Trois étapes pour la modélisation de la prise en compte

En appliquant le principe de conservation de la masse, on obtient un nouveau profil vertical de vitesse dans la lame. On différencie alors trois chemins dans le mur selon plusieurs hauteurs différentes et on calcule le profil de température dans le mur pour ces hauteurs.

Cette amélioration du calcul de la vitesse d'air dans la lame et de la prise en compte du gradient de température verticale dans la lame comme dans le mur est développé et sera confronté à des mesures à réaliser pour des solutions de protection solaire perméable.

### 5.2 Conclusions et suite de l'étude

Dans le cadre d'une solution non perméable, le modèle ici présenté permet bien d'améliorer la modélisation à l'échelle d'un élément d'enveloppe de bâtiment. La corrélation

utilisée pour déterminer la vitesse d'écoulement dans le mur et la convection associée a été sélectionnée notamment parce qu'elle permet de retrouver le phénomène d'inertie apporté par le matériau bois. Pour des solutions de protection solaire de type textile, le premier type de corrélation pourrait suffir.

La mesure comme la modélisation laisse entendre que pour le bardage bois, on se rapproche d'un cas où le mur n'aurait pas d'apport radiatif, mais une convection plus forte avec l'air extérieur et une température extérieure là aussi supérieure. Ces variations peuvent être traduites par une augmentation du coefficient de convection  $h$ , et de la température extérieure alors que le flux radiatif incident serait alors considéré comme nul. Ainsi la solution envisagée est un module permettant de calculer ces variations de températures et de coefficient de convection en fonction des propriétés de la protection solaire et des sollicitations extérieures pour améliorer la prise en compte de ces éléments par une plateforme de simulation thermique dynamique.

De nouvelles séries de mesure seront réalisées au printemps 2012, avec cette fois des solutions textiles ainsi que des protections végétales.

### Références

- [1] Rodriguez, Julio (2006) "*Déshydratation par effet de serre d'un produit emballé dans un film polymère perméable aux molécules d'eau: approche expérimentale et de modélisation* ». Doctorat Génie énergétique, Paristech > ENSAM 2006ENAM0002.
- [2] Cole, R. J., and N. S. Sturrock. 1977. The Convective Heat Exchange at the External Surface of Buildings. *Building and Environment*, Vol. 12, p. 207.
- [3] Ong, K. "A mathematical model of a solar chimney." *Renewable Energy* 28, no. 7 (June 2003): 1047-1060.
- [4] Aung, W., LS Fletcher, and V. Sernas. "Developing laminar free convection between vertical flat plates with asymmetric heating." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 15, no. 11 (1972): 2293-2304.
- [5] Gan, Guohui. "General expressions for the calculation of air flow and heat transfer rates in tall ventilation cavities." *Building and Environment* 46, no. 10 (April 2011): 2069-2080.
- [6] Bouyer, Julien. "Modélisation et simulation des microclimats urbains. Etude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments." Architecture. CERMA, 2009.